

片脚および両脚リバウンドジャンプにおける 3次元的な力発揮特性の相違

荻山 靖¹⁾ 藤井 宏明²⁾ 森 健一³⁾ 凵子 浩二⁴⁾

Yasushi Kariyama¹, Hiroaki Fujii², Kenichi Mori³ and Koji Zushi⁴: Differences in the characteristics of 3-dimensional joint kinetics between single-leg and double-leg rebound jump. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 58: 91-109, June, 2013

Abstract : This study aimed to clarify the 3-dimensional joint kinetics of the takeoff leg for the single-leg rebound jump (SRJ) and the double-leg rebound jump (DRJ). 14 male track and field athletes (sprinters, jumpers and decathletes) performed the SRJ and the DRJ with maximal effort. Kinematics and kinetics data were recorded using a Vicon T20 system (250 Hz) and force platforms (1000 Hz). The results of all the analyses were as follows:

1. In the SRJ, hip joint work around the adduction-abduction and internal-external rotation axes was higher than in the DRJ, because of larger hip abduction and internal rotational torque in the SRJ.
2. In the SRJ, hip abduction and internal rotation torque were larger than those in the DRJ. These may have been caused by the anatomical and mechanical differences between the SRJ and DRJ.
3. In the SRJ, hip abduction torque affected the increment in jump height. This result suggests that hip abduction torque affects the higher jump height for a single leg to a greater extent in the SRJ than in the DRJ.
4. In the SRJ, the trunk lateral flexion caused by trunk flexion torque reduced the lateral displacement of the center of gravity due to pelvic list.

These results suggest that 1) the SRJ is an effective training tool for improvement of technique and force output ability for prioritization of power output at the hip internal rotators, especially the hip abductors in addition to the hip extensor, and 2) hip abduction torque in the SRJ has a role in both postural control and determining the increment in jump height. These findings will be useful for clarifying the most pertinent points related to the SRJ and for developing an effective method that can be applied to plyometrics.

Key words : plyometric training, hip abduction torque, 3-dimensional motion analysis

キーワード : プライオメトリックトレーニング, 股関節外転トルク, 3次元動作分析

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

2) 環太平洋大学体育学部
〒709-0863 岡山県岡山市東区瀬戸町観音寺721

3) 武蔵大学人文学部
〒176-8534 東京都練馬区豊玉上 1-26-1

4) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

連絡先 荻山 靖

1. *Doctoral Program in Physical Education, Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

2. *Department of Physical Education, International Pacific University*

721 Kanonji, Seto, Higashi, Okayama 709-0863

3. *Faculty of Humanities, Musashi University*

1-26-1 Toyotamakami, Nerima, Tokyo 176-8534

4. *Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

Corresponding author y_kariyama@yahoo.co.jp

I 緒 言

下肢におけるパワー発揮能力の向上は、多くのスポーツ競技にとって優れたパフォーマンスを達成するための重要課題である。この能力を開発するための代表的なトレーニング手段としてプライオメトリックスが挙げられる。下肢のプライオメトリックスに関する研究では、両脚踏切で鉛直方向へ跳躍するリバウンドジャンプ (Double-leg Rebound Jump: DRJ) を対象としたものが多く、DRJ をトレーニング手段として用いることに対する有用な知見が多数存在している (Bobbert et al., 1987ab; Bobbert, 1990; 冨子・高松, 1995, 1996; Markovic, 2007; Markovic and Mikulic, 2010; Villarreal et al., 2009, 2010)。一方、実際のスポーツ競技では、片脚においてパワーを発揮する場面も多く存在しているために、トレーニング現場では両脚踏切に加えて片脚踏切のリバウンドジャンプ (Single-leg Rebound Jump: SRJ) についてもトレーニング手段として頻繁に用いられている。

SRJ と DRJ とでは、運動を遂行する上での前提条件が大きく異なっていると考えられる。具体的には、(1) SRJ は DRJ よりも片脚あたりに支持する必要のある身体質量が大きいこと、(2) SRJ では反対脚による振込動作が発生すること、(3) SRJ では片脚で身体を支持することから基底面が狭いこと、以上が挙げられる。近年、2次元平面上 (矢状面上) において、主に(1)と(2)に関して SRJ と DRJ を比較することで、SRJ は足関節における負および正のトルクパワーが小さく、股関節におけるトルクおよび負のトルクパワーが大きいことが明らかにされるとともに、股関節伸張筋群のパワー発揮を優先する技術や力発揮能力の改善に有益なトレーニング手段となる可能性が示唆されている (Kariyama et al., 2011; 荊山ほか, 2012)。しかしながら、これまでに(3)の機序による相違については検討されていない。

(3)をより詳細に考えると、SRJ は DRJ よりも基底面が左右方向に狭いことで力学的に不安定で

あること、身体重心をその基底面内に留めておくための姿勢制御が要求されることが予測される。

また、SRJ では片脚で骨盤を介して身体質量を保持するために、骨盤の安定性に関与する力学的な特徴や周辺筋群の筋力発揮特性が変化することも予測される。したがって、これらの機序による相違は、上述した矢状面だけでなく3次元的に生じていることが推察できる。このような相違は、リバウンドジャンプよりも単純な運動機構の片脚立位と両脚立位においても共通に生じており (勝平ほか, 2011)、片脚立位を成立させるために不可欠な動作パターンであることが知られている。そのために、(3)の機序により生じる SRJ と DRJ の相違を明らかにすることは、片脚跳躍としての本来的な SRJ の運動特性を明らかにする上で重要な検討課題であると考えられる。また、(2)のように SRJ では振込動作が発生していることから、振込動作がこれらの姿勢制御に影響を及ぼしている可能性のあることも考えられる。それに加えて、解剖学的にみると体幹部の中央に位置する脊柱は腰仙関節により骨盤と連結されており、また一方では骨盤と大腿部は股関節で連結されていることから、体幹部と骨盤、大腿部の3部位は複雑に動きながら SRJ を成立させていることも予測できる。以上のことから、3次元的な分析手法を用いて SRJ と DRJ の相違について検討し、両ジャンプの運動特性をより明確することができれば、下肢のプライオメトリックスとして SRJ と DRJ を用いる際のより詳細な留意点や効果的な利用法を考案することができると考えられる。

そこで本研究では、3次元的な分析により算出される、関節トルクやトルクパワー、仕事を手掛かりにして、最大努力で実施する SRJ と DRJ による運動特性の相違について明らかにすることを目的とした。

II 方 法

1. 被検者

被検者は、陸上競技の短距離、跳躍および混成

種目を専門とする男性14名 (age, 24.0 ± 0.9 years; height, 174.2 ± 6.3 cm; weight, 70.4 ± 4.2 kg) とした. 実験を開始するにあたり, すべての被検者に本研究の目的, 方法および実験にともなう安全性を十分に説明し, 実験へ参加のための同意を得た. 被検者は, 本研究で用いた実験試技を日常のトレーニングにおいて定期的に用いていたが, 事前に実験試技に関する説明を行ない, 十分に練習を行なわせた. 特に DRJ においては, 後述のように, 左右脚それぞれの地面反力を計測するために, 2枚のフォースプラットフォームを踏み分ける必要があることから, このような実験設定条件下においても不自然なフォームにならず, かつ最大努力で遂行できるよう, 十分に練習を行なわせた. なお, これらの手順は, 国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行なわれた.

2. 実験運動

片脚踏切を用いたリバウンドジャンプ (SRJ) として, 立位姿勢からその場で片脚踏切を用いた5回連続して跳躍する運動を, 両脚踏切を用いたリバウンドジャンプ (DRJ) として, 立位姿勢からその場で両脚踏切を用いた5回連続して跳躍する運動を用いた. SRJ については, 被検者自身の判断から, SRJ を行ないやすい方の脚を被検脚とした. 本研究は両ジャンプを下肢のプライオメトリックスとして用いる際の留意点について明らかにすることを目的としたため, 被検者が最大努力にて運動課題を達成しやすいように腕や脚の振込動作についての制限を加えなかった. いずれのジャンプについても, できる限り踏切時間を短くし, できる限り高く跳ぶことを口頭で指示して行なわせ, 5回のジャンプ中においてフォームを崩さず, かつ被検者の内省の良かった試技の中から, 後述する RJ-index が最も高い値を示したものを分析に用いた. なお, 試技間には疲労の影響を無くすために十分な休息をとらせた.

3. 測定項目および測定方法

両ジャンプの動作を3次元分析するために, 赤外線カメラ10台 (Vicon Motion Systems 社製, Vicon MX+, 250 Hz) を用いて, 反射マーカを添付した身体計測点47点の3次元座標データを250 Hz で収集した. 静止座標系は, 試技開始時の被検者前方に直交する方向を X 軸, 試技開始時の被検者前方を Y 軸, 鉛直上向きを Z 軸とする右手座標系と定義した. Wells and Winter (1980) の方法を用いて, 分析点毎に最適遮断周波数 (5—15 Hz) を決定し, 4次の位相ずれのない Butterworth digital filter による平滑化を行なった. また, 地面反力を測定するために, フォースプラットフォームを, SRJ では1台 (Kistler 社製, 9287B), DRJ では左右足それぞれにおいて測定するために2台 (Kistler 社製, 9281A; 9281C) 用いた. サンプリング周波数を1000 Hz とし, 各センサ出力を A/D 変換ボードによってコンピュータに取り込んだ.

4. 算出項目および算出方法

1) パフォーマンス変数

地面反力の波形から踏切時間と滞空時間を求め, 滞空時間を以下の式に代入することにより跳躍高を算出した. また, 分析試技直前の跳躍における跳躍高を算出し, 落下高とした.

$$\text{跳躍高} = (9.81 \cdot \text{滞空時間}^2) 8^{-1},$$

9.81は重力加速度 (m/s²)

RJ-index は, 跳躍高を踏切時間で除すことで算出した (図子ほか, 1993; 遠藤ほか, 2007).

2) 下肢関節角度

本研究では, 運動自由度を3とする, 14の関節により連結された15の剛体セグメントモデルによって全身をモデル化した. そして, 踏切脚における関節角度ならびに関節トルクを算出するために, 身体各部位の3次元座標から, 運動自由度ごとに移動座標系を設定した.

(1) 関節軸座標系の定義

足および膝関節においては, それぞれの関節における内顆および外顆の中点を関節中心とした.

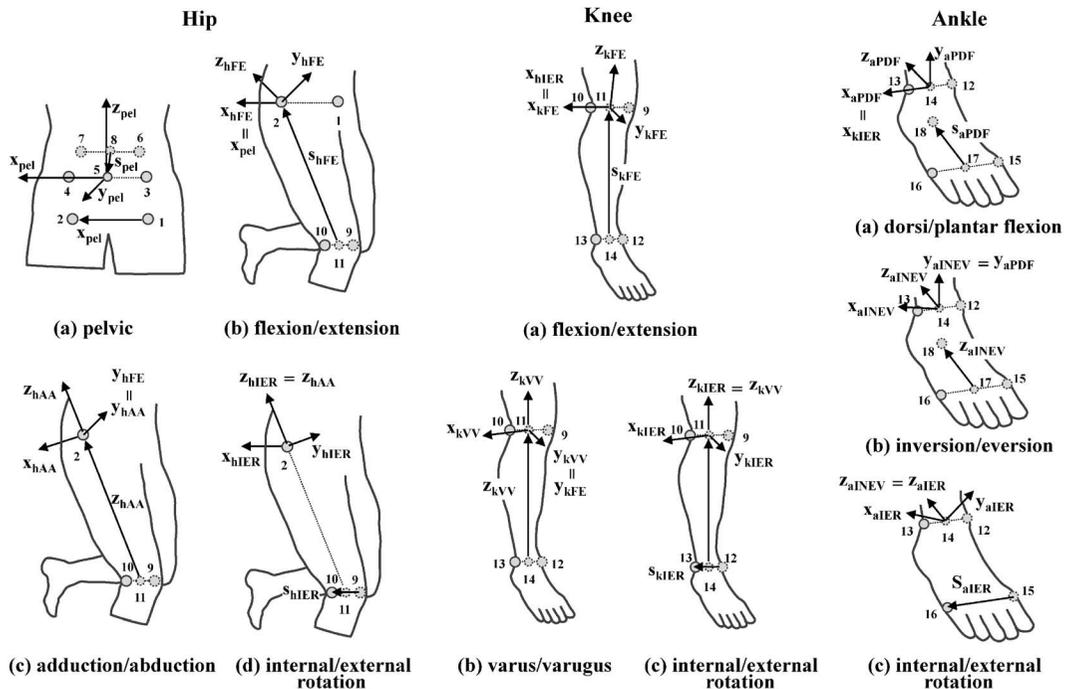


Fig. 1 Definition of coordinate system fixed at the hip, knee and ankle joints to calculate the joint angle of each joint.

1: center of left hip joint (2: right), 3: left ilium-anterior superior iliac spine (4: right, 5: center) 6: left ilium-posterior superior iliac spine (7: right, 8: center), 9: tibia-medial ridge of tibial plateau (10: lateral, 11: center), 12: tibia-apex of the medial malleolus (13: fibula-apex of the lateral malleolus, 14: center), 15: foot/PIP medial side (16: lateral, 17: center), 18: foot/calcaneus-center of posterior surface.

股関節については、臨床歩行分析研究会の推定法（倉林ほか，2003）を用いて関節中心を算出した。以下に、一例として右下肢の股関節における移動座標系の設定法について述べるが、同様の手順で、下肢末端に向かって膝関節の屈曲伸展、内外反、内外旋座標系、さらに、足関節の底背屈、内外反、内外旋座標系を順次定義した（Fig. 1）。なお、左下肢についても、右下肢と同様の手順を用いた。

左股関節中心から右股関節中心へ向かうベクトルを x_{pel} 軸、左上右後腸棘骨の midpoint から左上右前腸棘骨の midpoint に向かうベクトルを補助ベクトル s_{pel} 軸とし、 x_{pel} 軸と s_{pel} 軸のベクトル積により z_{pel} 軸を、 z_{pel} 軸と x_{pel} 軸のベクトル積により y_{pel} 軸を定義し、これを骨盤座標系とした。

骨盤座標系の x_{pel} 軸を x_{hFE} 軸、右膝関節中心

から右股関節中心へ向かうベクトルを s_{hFE} 軸とし、 x_{hFE} 軸と s_{hFE} 軸のベクトル積により z_{hFE} 軸を、 z_{hFE} 軸と x_{hFE} 軸のベクトル積により y_{hFE} 軸を定義し、これを股関節屈曲伸展座標系とした。

股関節屈曲伸展座標系の y_{hFE} 軸を y_{hAA} 軸、右膝関節中心から右股関節へ向かうベクトルを z_{hAA} 軸とし、 y_{hAA} 軸と z_{hAA} 軸のベクトル積により x_{hAA} 軸を定義し、これを股関節内外転座標系とした。

股関節内外転座標系の z_{hAA} 軸を z_{hIER} 軸、右膝関節内顆から右膝関節外顆へ向かうベクトルを s_{hIER} 軸とし、 z_{hIER} 軸と s_{hIER} 軸のベクトル積により y_{hIER} 軸を、 y_{hIER} 軸と z_{hIER} 軸のベクトル積により x_{hIER} 軸を定義し、これを股関節内外旋座標系とした。

(2) 関節角度および角速度

本研究では、解剖学的な可動域制限に基づき、股関節では、屈曲伸展、内外転および内外旋角度を、膝関節では、屈曲伸展および内外旋角度を、足関節では、底背屈および内外反角度について算出した。

股関節屈曲伸展角は、骨盤座標系の y_{pel} 軸と股関節屈曲伸展座標系の y_{hFE} 軸との角度差、股関節内外転角は、股関節屈曲伸展座標系の z_{hFE} 軸と股関節内外転座標系の z_{hAA} 軸との角度差、股関節内外旋角は、股関節内外転座標系の x_{hAA} 軸と股関節内外旋座標系の x_{hIER} 軸との角度差として、それぞれ算出した。

膝関節屈曲伸展角は、股関節内外旋座標系の y_{hIER} 軸と膝関節屈曲伸展座標系の y_{kFE} 軸との角度差、膝関節内外旋角は、膝関節内外反座標系の x_{kVV} 軸と膝関節内外旋座標系の x_{kIER} 軸との角度差として、それぞれ算出した。

足関節底背屈角は、膝関節内外旋座標系の y_{kIER} 軸と足関節底背屈座標系の y_{aPDF} 軸との角度差、足関節内外反角は、足関節底背屈座標系の z_{aPDF} 軸と足関節内外転座標系の z_{aINEV} 軸との角度差として、それぞれ算出した。

算出された角度を時間微分することで、角速度を算出した。符号の正負については、股関節では伸展、外転および外旋を正、屈曲、内転および内旋を負、膝関節では伸展および外旋を正、屈曲および内旋を負、足関節では底背屈および外反を正、背屈および内反を負とした。なお、以下に述べる関節トルクについても同様に設定した。

3) 前額面上における体幹角度、脚角度、骨盤角度および地面反力ベクトルの傾き

左右股関節中心の midpoint から左右肩関節中心の midpoint へ向かうベクトル、踏切脚における足関節中心から股関節中心へ向かうベクトルを静止座標系 XZ 平面上に投影し、静止座標系 Z 軸となす角度をそれぞれ体幹角度、脚角度とした。また、左右肋骨下端の midpoint から左右肩関節中心の midpoint へ向かうベクトル、左右股関節中心の midpoint から左右肋骨下端の midpoint へ向かうベクトル、左股関節中心から右股関節中心へ向かうベクトルを XZ 平面上に投

影し、Z 軸となす角度をそれぞれ体幹上部角度、体幹下部角度、骨盤角度とした。さらに、XZ 平面上における地面反力ベクトルと Z 軸となす角度を算出し、地面反力ベクトルの傾きとした。なお、値が正の場合には、踏切脚側へ回転していることを示している。

4) 関節トルクおよび関節力

(1) セグメント座標系の定義

身体に添付したマーカーを用いて、足、下腿、大腿において、セグメントの長軸方向に対して、互いが直行する3軸のセグメント座標系を設定した (Fig. 2a)。具体的に一例をあげると、大腿セグメントでは、膝関節中心から股関節中心へ向かうベクトルを z_{THI} 軸とし、膝関節外顆から膝関節内顆へ向かうベクトルから s_{THI} 軸を求め、 z_{THI} 軸と s_{THI} 軸のベクトル積により y_{THI} 軸を、 y_{THI} 軸と z_{THI} 軸のベクトル積により x_{THI} 軸を定義し、これを大腿座標系とした。

(2) 関節トルクおよび関節力

セグメント角速度を、小池ほか (2006) により算出し、各セグメントの重心位置、質量、慣性モーメント等の慣性パラメータについては、阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて算出した。そして、画像より得られた身体座標点の3次元座標値と、フォースプラットフォームにより計測された地面反力データとを用いて逆動力学的計算を行ない、踏切脚の関節トルクおよび関節力を算出した。

本研究では、解剖学的な可動域制限に基づき、股関節において、屈曲伸展軸、内外転軸、内外旋軸を、膝関節において、屈曲伸展軸、内外旋軸を、足関節において、底背屈軸、内外反軸をそれぞれ設定し、算出された静止座標系における関節トルクを、移動座標系における関節トルクへと変換した (小池ほか, 2006; Fig. 2b)。加えて、骨盤座標系を基準として体幹上部座標系を定義し、体幹の側屈を表す座標軸を設定し、体幹側屈トルクの算出に用いた (小池ほか, 2006)。また、股関節においては、後述する踏切前半局面 (Ecc. 局面) および後半局面 (Con. 局面) における各軸まわりのトルクの平均値を算出した。なお、脚

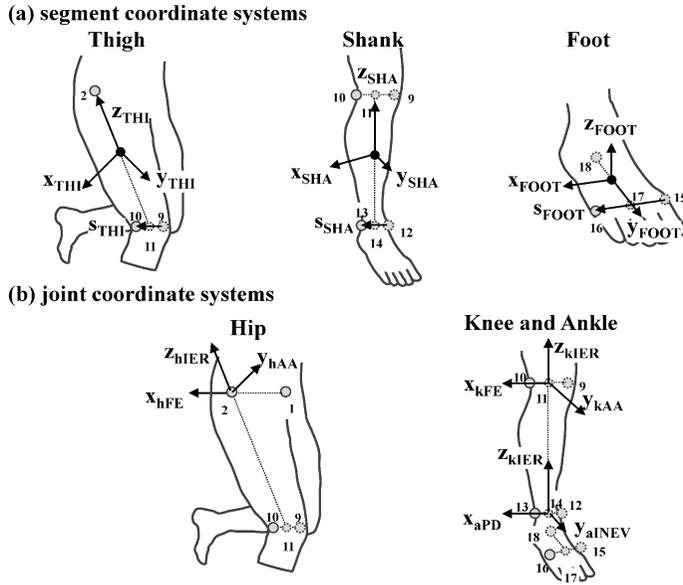


Fig. 2 Definition of the (a) segment coordinate systems fixed at the thigh, shank, foot segments to calculate the angular velocity of each segment, (b) joint coordinate systems fixed at the center of the hip, knee and ankle joints to express the anatomical joint rotations.

1: center of left hip joint (2: right), 9: tibia-medial ridge of tibial plateau (10: lateral, 11: center), 12: tibia-apex of the medial malleolus (13: fibula-apex of the lateral malleolus, 14: center), 15: foot /PIP medial side (16: lateral, 17: center), 18: foot/calcaneus-center of posterior surface.

の振込動作が踏切脚の股関節の内外転および内外旋トルク発揮に及ぼす影響について検討するために、静止座標系における振込脚の股関節トルクにより骨盤(下胴セグメント)に作用するトルクと、振込脚の股関節力により骨盤に作用するトルクを算出し、それぞれを踏切脚の股関節内外転座標系、股関節内外旋座標系へ投影することで、振込脚による踏切脚股関節内外転軸まわりへのトルクと振込脚による踏切脚股関節内外旋軸まわりへのトルクを算出した。

5) 関節トルクパワーおよび関節仕事

得られた関節トルクと関節角速度の内積を関節トルクパワー(以下、トルクパワー)とし、負および正のトルクパワーをそれぞれ時間積分することで関節仕事を算出した。なお、股関節においては、各軸まわりにおける負および正のトルクパワーの平均値を算出した。

5. 動作の局面分けおよびデータの規格化・平均化

本研究では、踏切局面を踏切足の着地から離地までとし、踏切局面を身体重心の最下降地点を基準に、踏切前半(Ecc.局面)および踏切後半(Con.局面)の2つの局面に分けた。両ジャンプにおいて各被検者が踏切局面に要した時間を100%としてデータを規格化し、1%ごとに平均した。また、地面反力、関節トルク、関節力を被検者の体重で規格化した。

6. 統計処理

各測定項目は平均値±標準偏差で示した。本研究ではSRJとDRJの平均値の差を検定するために対応のあるt検定を用いた。相関係数はPearsonの方法を用いて算出した。なお、有意性は危険率を5%未満で判定した。

Table 1 RJ-index, contact time, jump height and impulse in SRJ and DRJ

	SRJ	DRJ	SRJ-DRJ
RJ-index	1.317 ± 0.215	3.190 ± 0.546	-1.873*
Contact time (s)	0.229 ± 0.018	0.152 ± 0.013	0.077*
Jump height (m)	0.300 ± 0.035	0.480 ± 0.056	-0.180*
Vertical impulse (Ns/kg)	7.01 ± 0.26	3.67 ± 0.35	3.34*
Ecc. (Ns/kg)	3.46 ± 0.15	1.70 ± 0.31	1.76*
Con. (Ns/kg)	3.55 ± 0.19	1.97 ± 0.34	1.58*

* represent a significant difference between SRJ and DRJ, $p < 0.05$.

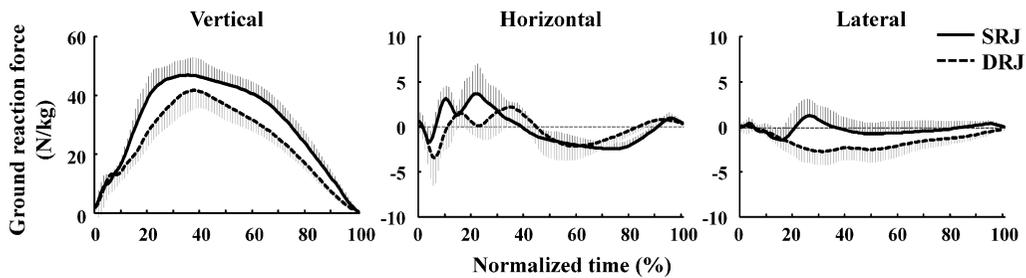


Fig. 3 Averaged patterns of vertical, horizontal and lateral ground reaction force during takeoff phase in SRJ and DRJ.

Ⅲ 結 果

SRJはDRJと比較して、RJ-indexおよび跳躍高は有意に低く、踏切時間は踏切局面全体でみても、踏切前半と後半に分けてみても有意に長いことが認められた (Table 1)。また、SRJおよびDRJの踏切前半に受け止めるエネルギーを反映する落下高についても有意に低いことが認められた (SRJ: 0.303 ± 0.023 m vs DRJ: 0.487 ± 0.050 m)。しかし、DRJにおける跳躍高および落下高を片脚あたり (半分) にして比較した場合には、SRJはDRJと比較して、逆に有意に高くなることが認められた。

Fig. 3には、鉛直方向、前後方向および左右方向それぞれの地面反力の時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。SRJはDRJと比較して、鉛直地面反力については踏切局面全体にわたって高い値で推移していた。前後方向の地面反力では、SRJとDRJにおいてその大きさおよびパ

ターンは類似しているとともに、鉛直地面反力に比べて極めて低い値で推移していた。また、左右方向の地面反力は、SRJとDRJにおいて発揮パターンこそ異なるものの、その大きさは他の成分の地面反力に比べて極めて低く、踏切局面の30%付近からほぼゼロに近い値で推移する傾向を示した。なお、鉛直方向の力積についても、SRJはDRJと比較して、踏切局面全体でみても、踏切前半と後半に分けてみても有意に大きいことが認められた (Table 1)。

Fig. 4には、踏切脚の足関節における関節角速度、関節トルクおよびトルクパワーの時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。屈伸軸については、SRJおよびDRJともに各項目の変化パターンは類似していた。しかし、その大きさについては、SRJはDRJと比較して、関節トルクは踏切局面を通してわずかに高い値で推移しており、関節角速度およびトルクパワーは負の方向と正の方向のいずれにおいても低い値で推移する傾向を示した。なお、内外反軸については、すべ

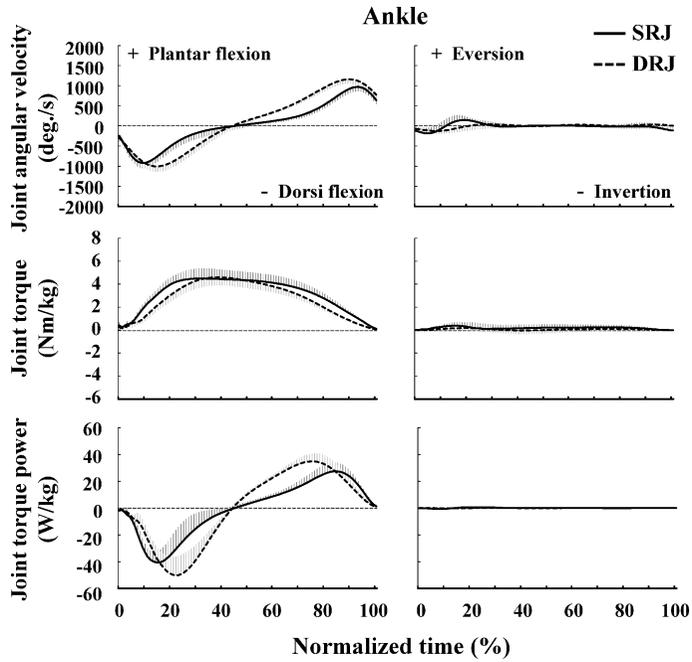


Fig. 4 Averaged patterns of joint angular velocity, joint torque and joint torque power about the ankle joint during takeoff phase in SRJ and DRJ.

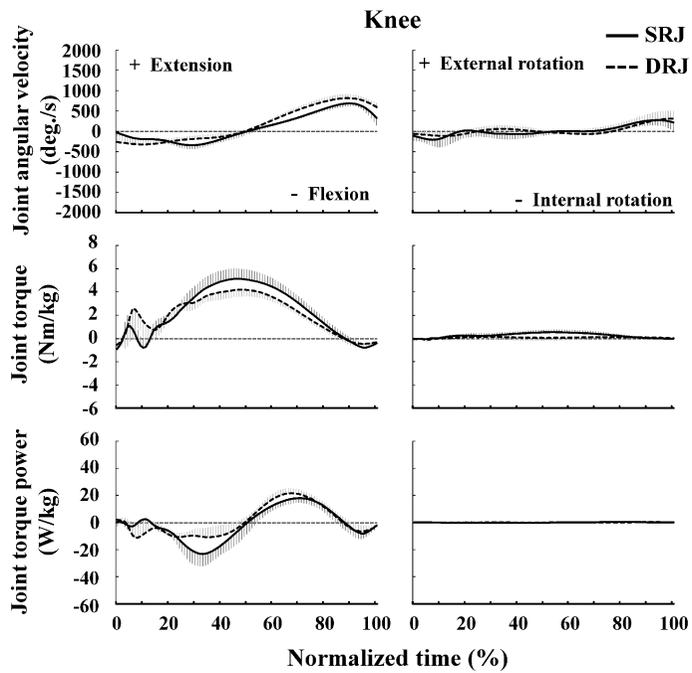


Fig. 5 Averaged patterns of joint angular velocity, joint torque and joint torque power about the knee joint during takeoff phase in SRJ and DRJ.

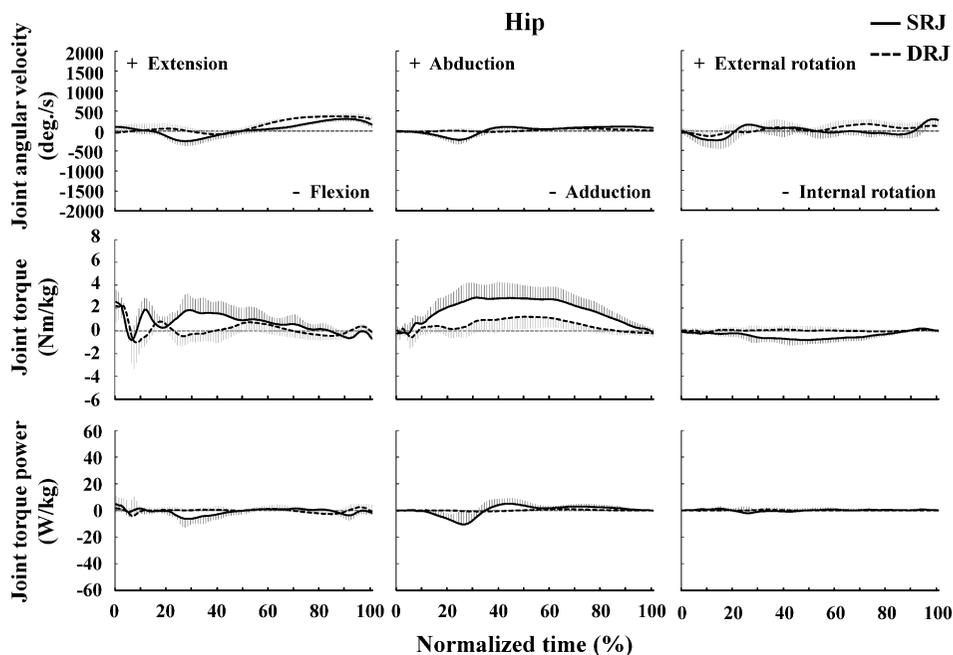


Fig. 6 Averaged patterns of joint angular velocity, joint torque and joint torque power about the hip joint during takeoff phase in SRJ and DRJ.

での項目において屈曲伸展軸よりも極めて低く、ほぼゼロに近い値で推移する傾向を示した。

Fig. 5 には、踏切脚の膝関節における関節角速度、関節トルクおよびトルクパワーの時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。屈曲伸展軸においては、SRJ および DRJ とともに各項目の変化パターンは類似していた。その大きさは、SRJ は DRJ と比較して、関節角速度およびトルクパワーは、踏切局面の20%付近までは負の方向へ低く、20%付近からは高く、50%付近から正の方向へ低く推移する傾向を示した。なお、SRJ は DRJ と比較して、関節トルクは踏切局面の0%から30%あたりまで低く推移するが、その後は80%付近まで高い値で推移する傾向を示した。内外旋軸については、SRJ および DRJ とともに踏切局面全体にわたって正（外旋）の方向へ関節トルクを発揮しているものの、屈曲伸展軸に比べて極めて低く、ほぼゼロに近い値で推移する傾向を示した。

Fig. 6 には、踏切脚の股関節における関節角速度、関節トルクおよびトルクパワーの時系列的な

変化パターンを規格化時間で示した。屈曲伸展軸については、DRJ ではほとんどみられなかった屈曲速度や負のトルクパワーが SRJ においては確認された。また、その大きさは、SRJ は DRJ と比較して負の関節角速度は高く、正の関節角速度は低く推移しており、関節トルクはほぼ踏切局面全体に渡って高く推移し、負のトルクパワーも高く推移している傾向を示した。内外旋軸においては、DRJ ではほぼ確認できなかった内転および外転速度やトルクパワーが発揮されていた。また、その大きさについても、SRJ は DRJ と比較して、負さらに正の関節角速度およびトルクパワーは高く推移し、特に関節トルクにおいては踏切局面全体にわたって極めて高い値で推移しており、股関節屈曲伸展軸まわりのトルクよりも高い値であった。内外旋軸においては、SRJ および DRJ とともに踏切局面全体にわたって負（内旋）の方向へ関節トルクを発揮しているが、その大きさについては SRJ において DRJ よりも高い値で推移する傾向を示した。

Fig. 7 には、股関節におけるトルクおよびトル

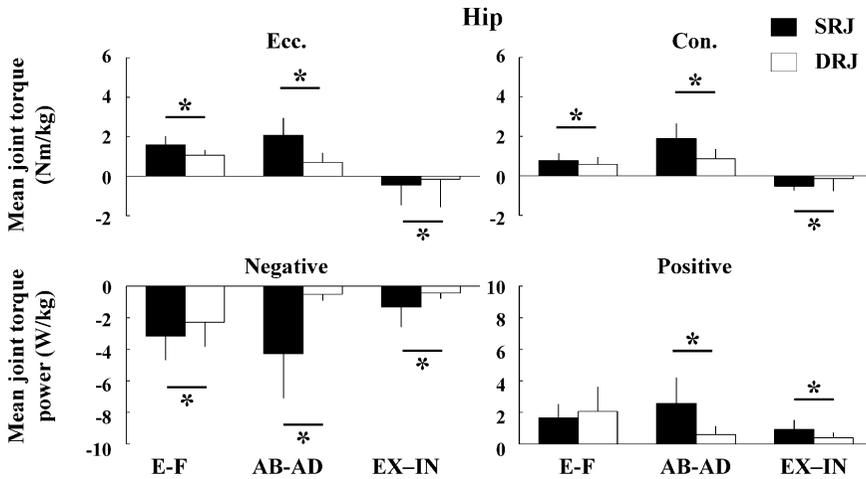


Fig. 7 Comparison of mean joint torque and mean joint torque power about the hip joint during takeoff phase between SRJ and DRJ.

E-F: extension-flexion, AB-AD: abduction-adduction, EX-IN: external rotation-internal rotation, * represent a significant difference between SRJ and DRJ, $p < 0.05$.

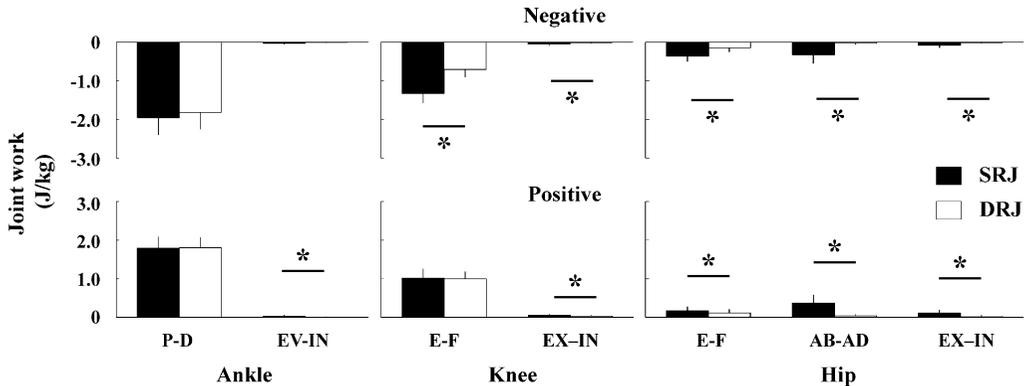


Fig. 8 Comparison of joint work done by joint torque about the ankle, knee and hip joints during takeoff phase between SRJ and DRJ.

P-D: plantar flexion-dorsi flexion, EV-IN: eversion-inversion, E-F: extension-flexion, EX-IN: external rotation-internal rotation, AB-AD: abduction-adduction.

* represent a significant difference between SRJ and DRJ, $p < 0.05$.

クパワーの平均値について示した。SRJはDRJと比較して、Ecc.およびCon.局面において伸展、外転および内旋トルクが有意に大きく、屈曲伸展軸、内外転軸、および内外旋軸まわりの負のトルクパワー、さらに、内外転軸および内外旋軸まわりの正のトルクパワーが有意に大きいことが認められた。

Fig. 8には、踏切脚の関節仕事について示した。

SRJとDRJともに共通して、足関節の底背屈軸まわりの関節仕事は、他の関節・関節軸まわりの関節仕事よりも大きな値を示した。また、負の関節仕事においては、SRJはDRJと比較して、膝関節の屈曲伸展軸および内外旋軸、股関節の屈曲伸展軸、内外転軸および内外旋軸まわりの関節仕事が有意に大きいことが認められた。正の関節仕事においては、SRJはDRJと比較して、足関節

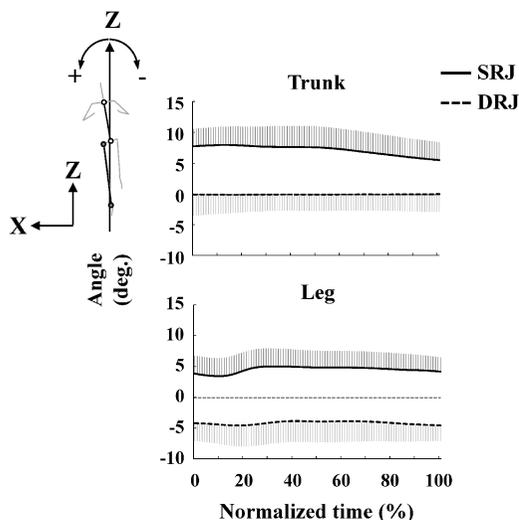


Fig. 9 Averaged patterns of the trunk and leg angle during takeoff phase in SRJ and DRJ from the frontal plane.

の内外反軸，膝関節の内外旋軸，股関節の屈曲伸展軸，内外転軸および内外旋軸まわりの関節仕事に有意に大きいことが認められた。

Fig. 9 には，静止座標系 XZ 平面上（前額面上）における体幹角度および脚角度の時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。体幹角度においては，DRJ では踏切局面全体を通してほぼゼロに近い値で推移する傾向を示したが，SRJ では踏切局面全体を通して DRJ よりも正の方向に大きな値で推移する傾向を示した。脚角度においては，DRJ では踏切局面全体を通して負の値で推移する傾向を示したが，SRJ では反対に踏切局面全体を通して正の値で推移する傾向を示した。なお，前額面上における地面反力ベクトルの傾きは，踏切局面全体（SRJ: 0.935 ± 1.324 degree vs DRJ: -4.543 ± 1.715 degree, $p < 0.05$ ），Ecc. 局面（SRJ: 0.630 ± 1.766 degree vs DRJ: -2.781 ± 2.543 degree, $p < 0.05$ ）および Con. 局面（SRJ: 1.104 ± 1.339 degree vs DRJ: -5.497 ± 1.871 degree, $p < 0.05$ ）のいずれの平均値においても，SRJ は DRJ と比較してその値の大きさは有意に大きいこと，すなわち，SRJ の地面反力ベクトルはより垂直位であることが認められた。

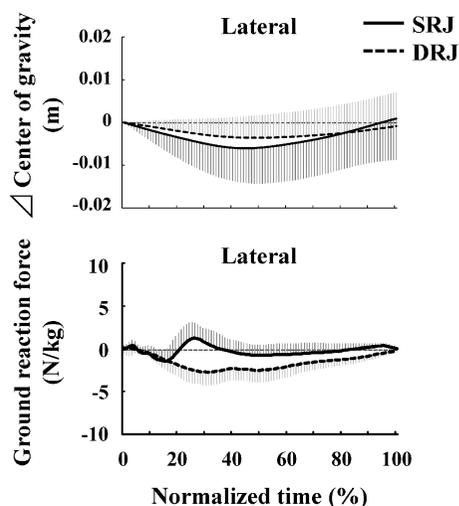


Fig. 10 Averaged patterns of lateral displacement about center of gravity relative to the instance of the landing position during takeoff phase in SRJ and DRJ.

Fig. 10 には，静止座標系における左右成分の身体重心変位について，踏切接地時の身体重心位置を基準とした時系列的な変化パターンを規格化時間で示し，左右成分の地面反力のそれと並べて示した。SRJ は DRJ と比較して，負の方向へ高い値で推移している傾向を示したが，その大きさおよび差は極めて小さく，そのパターンには個人差が大きかったために，踏切局面中の総移動距離（SRJ: 0.013 ± 0.008 m, DRJ: 0.008 ± 0.004 m）には SRJ と DRJ に有意な差は認められなかった。

Fig. 11 には，SRJ の振込脚によるトルクおよび踏切脚の股関節トルクの変化パターンを，内外転および内外旋軸まわりについてそれぞれ規格化時間で示した。振込脚による踏切脚股関節内外転軸まわりへのトルクについては，ほぼ踏切局面全体にわたって正の値で推移する傾向を示した。一方，振込脚による踏切脚股関節内外旋軸まわりへのトルクは，踏切局面全体にわたって負の値で推移する傾向を示したものの，その値は極めて小さく，ほぼゼロに近い値で推移する傾向を示した。

Fig. 12 には，RJ-index および跳躍高と，Ecc. および Con. 局面における股関節外転トルクの平均値との間の相関関係について，SRJ と DRJ そ

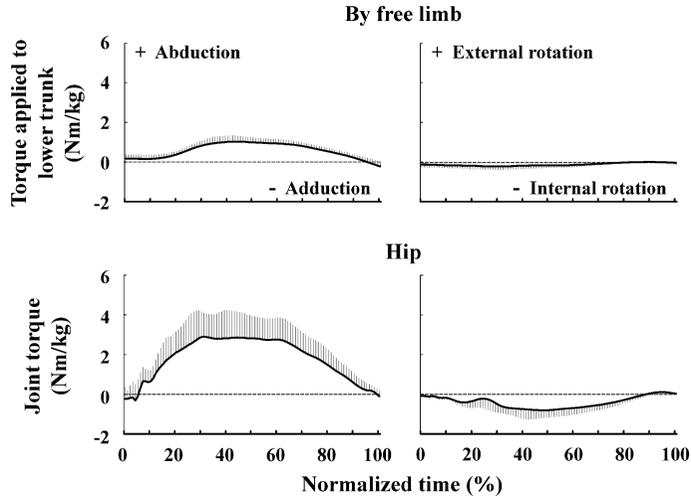


Fig. 11 Averaged patterns of the torque applied lower trunk by free limb and hip joint torque about takeoff leg during takeoff phase in SRJ.

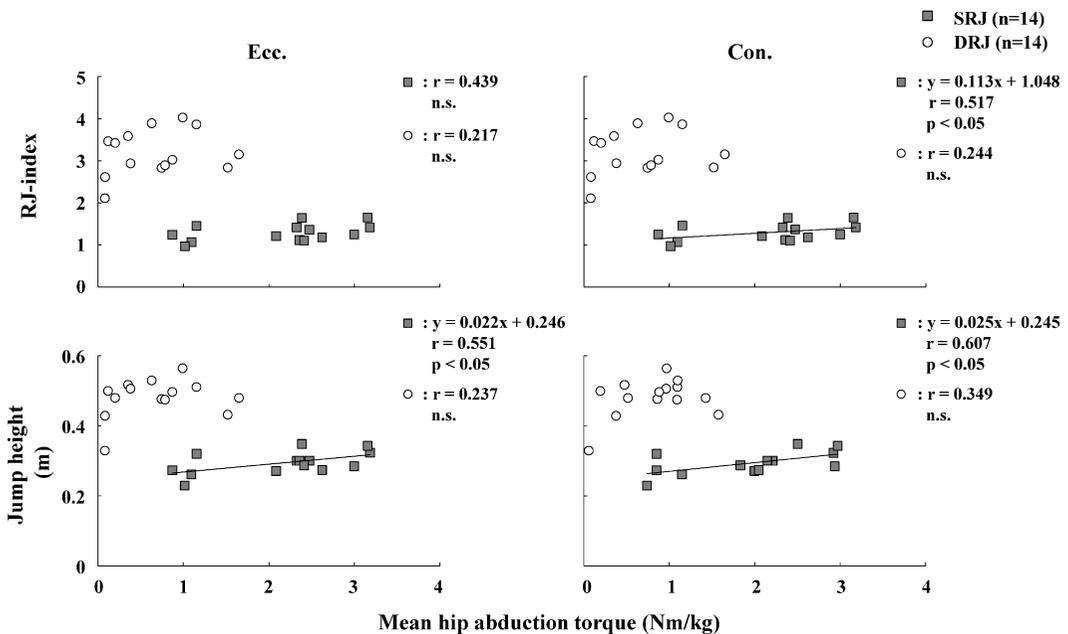


Fig. 12 Relationships between RJ-index, jump height and mean abduction torque about hip joint during takeoff phase in SRJ and DRJ.

れぞれについて示した。DRJでは、すべての項目間において有意な関係性は認められなかったものの、SRJでは、RJ-indexとCon.局面の股関節外転トルクの平均値との間 ($r = 0.517$, $p < 0.05$)、跳躍高とEcc.局面の股関節外転トルクの

平均値 ($r = 0.551$, $p < 0.05$) およびCon.局面の股関節外転トルクの平均値 ($r = 0.607$, $p < 0.05$) との間に関連関係が認められた。なお、踏切時間とEcc.およびCon.局面それぞれの股関節外転トルクとの間には、SRJおよびDRJ共に

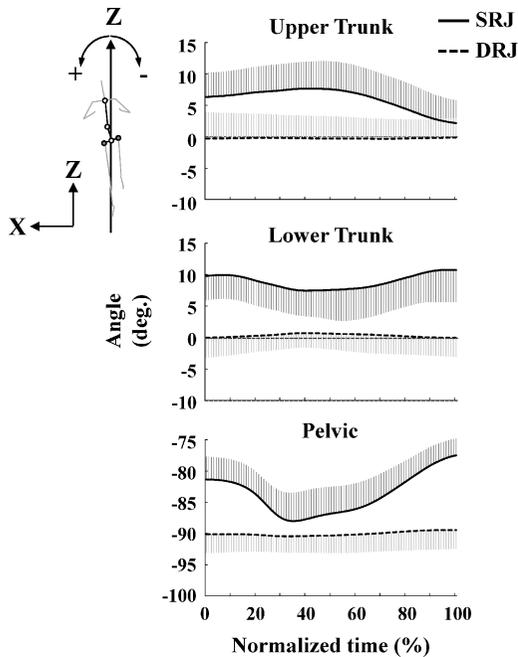


Fig. 13 Averaged patterns of the upper trunk, lower trunk and pelvic angle during takeoff phase in SRJ and DRJ from the frontal plane.

有意な関係性はみられなかった。

Fig. 13には、前額面上における体幹上部角度、体幹下部角度および骨盤角度の時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。体幹上部角度、体幹下部角度および骨盤角度すべてにおいて、DRJでは踏切局面全体を通してほぼゼロに近い値で推移する傾向を示した。一方SRJでは、骨盤角度は踏切接地後、踏切局面の40%付近まで負の方向へ大きな値で推移し、その後正の方向へ大きく変化する傾向を示した。また、体幹下部角度は骨盤と同様の変化パターンを示すもののその変化量は少ないこと、体幹上部角度では骨盤角度とはほぼ逆位相で推移する傾向を示した。

Fig. 14には、体幹側屈トルクの時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。DRJでは踏切局面を通して、ほぼゼロに近い値で推移する傾向を示したが、SRJでは踏切局面の20%付近から80%付近までDRJよりも正の方向（左側屈）に大きな値で推移する傾向を示した。

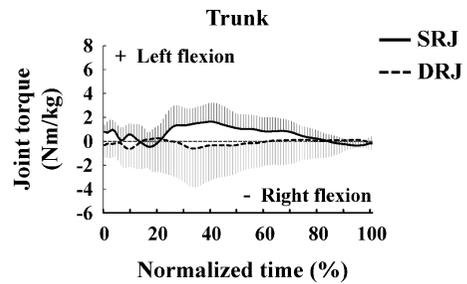


Fig. 14 Averaged patterns of joint torque about the trunk joint during takeoff phase in SRJ and DRJ.

Ⅳ 考 察

本研究では、3次元的な分析により算出される関節トルクやトルクパワー、仕事を手掛かりにして、最大努力で実施するSRJとDRJによる運動特性の相違を明らかにしようとした。そのため、日頃からSRJおよびDRJをトレーニング手段として用いている、体育大学の陸上競技選手（短距離、跳躍、および混成選手）を対象にするとともに、実験条件下における事前練習を十分に行なわせることによって、両ジャンプを最大努力で精度よく行なうことができるようにした。また、両ジャンプを矢状面（屈曲伸展軸）からみると、SRJとDRJ共に足関節における関節仕事、関節トルクおよびトルクパワーが他の関節よりも大きい、足関節優位の跳躍運動であること、両ジャンプを比較した場合には片脚あたりの跳躍高はSRJがDRJよりも大きいこと、SRJにおいて足関節のトルクパワーが小さく、股関節のトルクおよび負のトルクパワーが大きいことが認められ、荊山ほか（2012）の示す矢状面での特徴と一致するものであった（Fig. 4, 5, 6, 7 and 8）。以上のことから、本研究のSRJとDRJは適切に遂行されており、本研究の実験結果により、SRJとDRJにおける3次元的な力発揮特性の相違を明確にできると考えられる。

1. DRJ との比較からみた SRJ における 3 次元的な力発揮特性

まず本研究では、3 次元的に算出した関節仕事から、両ジャンプの力発揮特性の相違について検討を行なった。その結果、SRJ は DRJ と比較して、股関節の屈曲伸展軸まわりの関節仕事が大きいことに加えて、股関節の内外転軸および内外旋軸まわりの負および正の関節仕事が大きいことが認められた (Fig. 8)。したがって、3 次元的に検討した場合には、SRJ は DRJ よりも股関節内外転および内外旋に関与する筋群が大きなエネルギーを発揮する跳躍運動であることが明らかとなった。

股関節が発揮したトルク、さらにトルクパワー発揮について、内外転軸まわりを対象に検討すると、SRJ は DRJ と比較して、Ecc. および Con. 局面の外転トルクの平均値、負および正のトルクパワーの平均値が有意に大きいことが認められた (Fig. 7)。また、SRJ の股関節外転トルクは股関節における他の関節軸まわりに発揮されたトルクよりも大きな値であった (Fig. 6 and 7)。次に、内外旋軸についてみると、SRJ は DRJ と比較して、Ecc. および Con. 局面の内旋トルクの平均値が大きく、さらに、この内旋トルク発揮の大きさが影響して負および正のトルクパワーの平均値が

大きいことが認められた (Fig. 6 and 7)。以上のことから、SRJ における股関節内外転および内外旋軸まわりの関節仕事の大きさには、それぞれ外転トルクおよび内旋トルク発揮が大きな影響を及ぼしており、SRJ と DRJ とでは 3 次元的なトルク発揮に相違が存在していることが示された。

2. SRJ における股関節外転および内旋トルクの大きさに影響する要因

SRJ において DRJ よりも股関節外転トルク発揮が大きくなる機序としては、(1) SRJ は DRJ よりも狭い基底面内に身体重心を留めるための姿勢制御が要求されること、また、これに関連して(2) SRJ は片脚で骨盤を介して身体質量を保持するために、骨盤の保持および安定性に関与する力学的な特徴や周辺筋群の筋力発揮特性が変化すること、(3) SRJ は片脚踏切であることから主に左右方向において基底面が狭く力学的に不安定であること、(4) 片脚あたりに作用する身体質量が大きいこと、(5) 反対脚による振込み動作が発生すること、以上のことが推察される。

本研究では、まず、(1)および(2)による影響について検討するために、典型例を用いて静止座標系の XZ 平面上 (前額面上) における踏切動作と地面反力ベクトルの傾きと大きさとの関係から検討

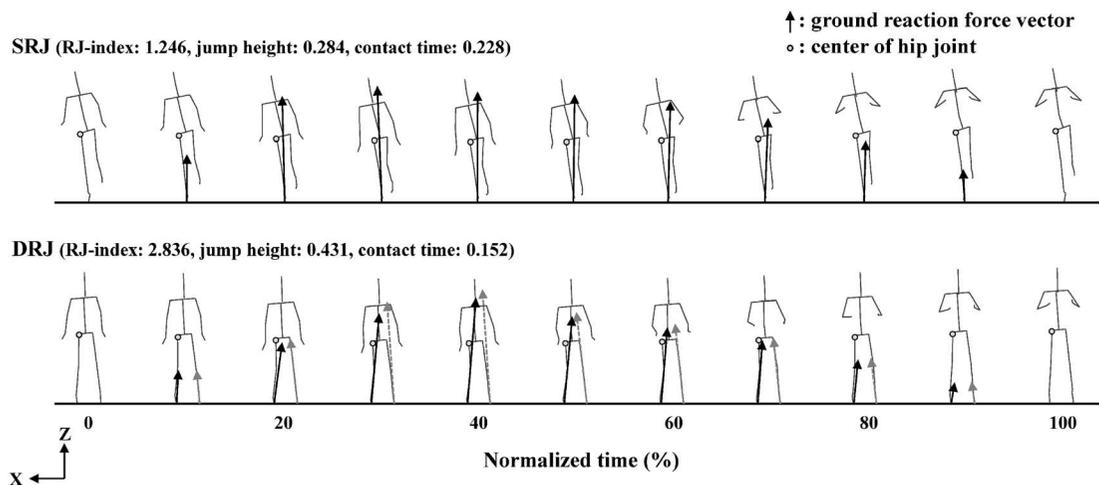


Fig. 15 Exemplar stick figure and ground reaction force vector during takeoff phase in SRJ and DRJ from the frontal plane.

を加えた (Fig. 15). その結果, SRJ は DRJ よりも踏切局面全体を通して身体が踏切脚側に傾いていることが確認できた (Fig. 15). この際, 体幹角度および脚角度をみると, SRJ は DRJ よりも両角度が踏切局面を通して踏切脚側に傾いており (Fig. 9), これにより身体の傾きが形成されていることが認められた. このことは, 上述の(1)により生じたものであり, 身体重心を基底面内に留めておくための動作であると考えられる. また, (2)に示したように, SRJ では踏切脚のみで骨盤を保持しているために, DRJ よりも踏切中に股関節内転運動が発生していることも確認できた (Fig. 6 and 15). SRJ ではこのような動作により股関節中心が踏切脚側に移動することになり, DRJ よりも股関節中心から地面反力ベクトルまでの距離 (簡易のモーメントアーム長, 以下, 単にモーメントアーム長) が長くなっていると考えられる. 実際に, このモーメントアーム長を算出したところ, 踏切局面全体 (SRJ: 0.091 ± 0.027 m vs DRJ: 0.065 ± 0.014 m, $p < 0.05$), Ecc. 局面 (SRJ: 0.091 ± 0.032 m vs DRJ: 0.066 ± 0.018 m, $p < 0.05$), Con. 局面 (SRJ: 0.091 ± 0.026 m vs DRJ: 0.061 ± 0.016 m, $p < 0.05$) いずれの平均値においても, SRJ は DRJ と比較して有意に大きいことが認められた. 一方, 前額面上における地面反力ベクトルの傾きは, DRJ においてより遊脚側に傾いており, SRJ ではより垂直位であることが認められた. このことは, 典型例においても確認することができるため (Fig. 15), 地面反力ベクトルの傾きは SRJ と DRJ におけるモーメントアーム長の相違へ影響していないと考えられる. 以上のことから判断すると, SRJ における DRJ よりも長いモーメントアーム長は, (1)および(2)の機序による影響を受けていること, 言い換えると, 股関節外転トルクは, 身体の踏切脚側への傾きを保持するとともに, 骨盤の落下や身体の過度の倒れこみを防ぎ, SRJ を成立させるために発揮されているものと考えられる. ここで, 左右方向の身体重心変位に着目すると (Fig. 10), SRJ においては平均値こそ DRJ よりも負の方向へ高い値で推移していたものの, その大きさおよ

び差は極めて小さく, 総移動距離に有意差は認められなかった. これに加え, 上述のように SRJ における左右成分の地面反力は, 他の成分の地面反力よりも極めて小さく, 踏切局面の30%付近からはほぼゼロに近い値で推移していたことを考慮すると, SRJ は(3)に示したように主に左右方向において基底面が狭く力学的に不安定であるものの, 上述のように股関節外転トルクを発揮することで身体の左右方向へ安定性を確保しているものと考えられる. このような股関節外転トルクにみられる SRJ と DRJ の相違は, より単純な運動形態である片脚立位と両脚立位による相違 (中村ほか, 2007; 勝平ほか, 2011) と類似している. 前額面上における片脚立位と両脚立位の相違は, SRJ と DRJ の相違と同様, (1)に示した機序により, 地面反力ベクトルと支持脚股関節中心とのモーメントアームが長くなること (勝平ほか, 2011), また, 片脚立位では(2)に示したように, 正常な立位を確保するために骨盤の振込脚側への過度の傾きを抑える必要があること (中村ほか, 2007) から, 支持脚において両脚立位よりも大きな股関節外転トルクが発揮されることが示されている. これらを考慮すると, 股関節外転トルク発揮は, 片脚立位に限らず SRJ においても姿勢を保持し SRJ を成立させるための必然的な力発揮であると考えられる. さらに, 片脚立位は両脚立位と比較して, 片脚あたりの身体質量が大ききことで片脚が発揮する鉛直方向の地面反力が大きくなり, これに抗するために股関節外転トルク発揮が大きくなっていることも示されている (勝平ほか, 2011). このことから, SRJ においても同様に, (4)に示した片脚あたりの身体質量が大ききことが影響して鉛直地面反力(地面反力ベクトル)が大きくなり, 股関節外転トルク発揮に影響を及ぼしていることが推察される.

次に, SRJ における DRJ よりも大きな内旋トルク発揮に影響する要因について検討すると, 外転トルクと同様に, 上記の(1)で示した機序の影響により股関節中心と地面反力ベクトルとのモーメントアームが長くなっていることが, 内旋トルク発揮の大きさに影響していると考えられる. これ

により、SRJではDRJよりも大きな外旋モーメントが股関節まわりへ作用し、身体の回旋運動が促されることになる。内旋トルクはこれに抗するために発揮され、身体の回旋運動を抑制することで姿勢制御を行なっていることが推察される。

ところで、SRJでは(5)のように、脚の振込動作によって鉛直地面反力や踏切脚股関節伸展トルクの増大に影響を及ぼす可能性が示唆されている(荊山ほか, 2012)。また他にも、振込脚は踏切脚の股関節を構成する骨盤と連結されていることから、骨盤を介して踏切脚の股関節外転および内旋トルク発揮へ影響を及ぼしている可能性のあることが推察できる。この可能性について検討したところ(Fig. 11)、振込脚による踏切脚股関節内外旋軸まわりへのトルクは、踏切局面全体にわたって負の方向へ推移しているもののその値は極めて小さいことから、脚の振込動作による股関節内旋トルク発揮への影響は極めて小さいものと考えられる。一方、振込脚による踏切脚股関節内外転軸まわりへのトルクは、踏切局面全体にわたって正の値で推移する傾向を示した。このことは、脚の振込動作により、踏切脚の股関節を内転させるように骨盤を回転させる力が生じていることを意味している。そのために、股関節外転トルクは振込脚による骨盤の振込脚側への下降を防ぐためにも発揮されている可能性のあることが示唆される。しかし、これについては今後、SRJにおいて脚の振込動作を制限する試技としない試技の比較を行なうことによって、検証していく必要があると考えられる。

3. 股関節外転トルク発揮がSRJの遂行能力におよぼす影響

以上のように本研究では、SRJにおいてDRJよりも股関節外転および内旋トルク発揮が大きいことには、両ジャンプを成立させる際の解剖学および力学的諸条件の相違による影響を受けていること、さらに、股関節外転および内旋トルク発揮の役割について姿勢制御という立場から考察してきた。ここで、前額面上における骨盤の運動に着目すると、骨盤は着地直後に遊脚側へ傾くもの

の、その後離地に向けて大きく拳上していることが確認できる(Fig. 13 and 15)。解剖学的にみると、骨盤と大腿部は股関節で連結されており、股関節の主要な外転筋である中臀筋や大腿筋膜長筋はそれぞれ骨盤と大腿に付着していることから、SRJにおける股関節外転トルク発揮は上記の骨盤の拳上動作に影響しているものと考えられる。さらに、体幹部の中央に位置する脊柱は腰仙関節により骨盤と連結されていることから、体幹部と骨盤は同一セグメントではなく、それぞれが異なる運動(例えば、骨盤が股関節を中心に拳上されると、体幹部はその逆の振込脚側へ傾く)を遂行することによりSRJを成立させていることが予測される。これらのことを考慮すると、SRJにおける骨盤の拳上動作は、骨盤の上に搭載されている身体部位を鉛直上方へ持ち上げるようになるために、それを導く股関節外転トルク発揮は身体重心の鉛直速度獲得、すなわち跳躍高の増大に影響を及ぼしている可能性がある。この仮説は、SRJにおける股関節内外転軸まわりの関節仕事(Fig. 8)や股関節外転トルクの大きさがDRJよりも顕著に大きく、SRJにおける外転トルクがSRJの遂行能力に影響する股関節伸展トルク(荊山ほか, 2012)よりも大きいこと(Fig. 6 and 7)からも支持される。そこで、両ジャンプにおけるRJ-indexと跳躍高、踏切時間および股関節外転トルクの平均値との間の相関関係について検討したところ、SRJにおいてのみRJ-indexおよび跳躍高と股関節外転トルクとの間に有意な相関関係が認められた(Fig. 12)。これらのことから、SRJにおける股関節外転トルクは上述した姿勢制御という役割と共に、跳躍高の増大という役割の2側面を有している可能性のあることが示唆された。このことは、SRJがDRJよりも片脚あたりにより高く跳ぶことのできる要因の1つとして、股関節外転トルクによる跳躍高の獲得が挙げられることを意味していると考えられる。今後は、その程度を定量化し、他の関節・関節軸まわりのそれと比較することで、股関節外転トルクの役割をより明確にしていくことが重要であろう。

一方、SRJにおいてこのような骨盤の拳上動作が生じた際、それより上に位置する体幹部が共に側方へ回転してしまうと身体重心が支持基底面から外れ、身体全体が側方へ転倒してしまい、SRJが成立しないことになる。上述のように、脊柱と骨盤は腰仙関節により連結されていること、さらに、体幹部を構成する脊柱は32から34個の椎骨から構成されていることから判断すると、体幹部はSRJを成立させるために骨盤とは異なる方向へ複雑に動いている可能性のあることが推察できる。この可能性について、前額面上における体幹部を上部と下部に分けてそれぞれの角度を算出し、骨盤角度との比較から検討したところ、体幹下部は骨盤と同様の変化パターンを示すもののその角度変化は少ないこと、さらに、体幹上部は骨盤とはほぼ逆位相で回転していることが認められた (Fig. 13)。これらのことは、体幹部 (特に体幹上部) と骨盤はそれぞれが異なる方向へ運動していること、さらに、体幹部では側屈運動が生じていることを意味している。ここで、体幹側屈運動が生じる原因について検討するために体幹側屈トルクを算出してみると、SRJにおいてDRJよりも大きな体幹側屈トルクが発揮されており、これにより体幹の側屈運動が生じていることが明らかとなった (Fig. 14)。体幹側屈トルクによる側屈運動は、上述の(1)の機序により生じている動作であり、骨盤の拳上動作に対し、身体重心の左右変位を抑えるために生じていると推察される。また一方で、この体幹側屈トルクは体幹の側屈と共に骨盤の拳上動作にも影響を及ぼしていることも考えられるため、今後、側屈トルクによる骨盤の拳上動作に対する影響の程度について見積もることも重要な課題であろう。

4. 実践への示唆

本研究の結果から、最大努力で実施するSRJはDRJと比較して、股関節の外転および内旋トルク発揮が大きいこと、さらにSRJにおける股関節外転トルク発揮は姿勢制御という役割と共に、跳躍高の増大という役割の2側面を有している可能性のあることが示唆された。そのため、

SRJは股関節の伸筋群 (荊山ほか, 2012) のみならず、内旋筋群、特に外転筋群のパワー発揮を優先する技術や力発揮能力の改善に対して有効なトレーニング手段になると考えられる。

これまで、SRJのような片脚跳躍は両脚跳躍と比較した際に、片脚あたりに保持する必要のある身体質量が大きいことから、より負荷の高い運動 (Chu, 1998; 有賀, 2007; Baechle and Earle, 2008; McNeely and Sandler, 2009; 渡邊ほか, 2009) として紹介されることも少なくなかった。しかし、本研究の結果から、SRJとDRJにおける股関節外転および内旋トルク発揮の相違は、片脚あたりの身体質量の相違以外にも、SRJを成立させる際に発生する解剖学のおよび力学的な諸条件が異なることにより生じており、このことが、両ジャンプの運動特性の相違に大きく影響していることが示された。したがって、SRJとDRJは本来的な特性の異なる運動であること、すなわち、両ジャンプの相違は単に負荷の大きさだけでなく、股関節外転トルク発揮の相違に代表されるように、片脚踏切であることで必然的に生じる筋の動員様相や踏切動作による相違を理解した上で、それぞれをトレーニング手段として用いることが重要であると考えられる。

V 要 約

本研究では、3次元的な分析により算出される、関節トルクやトルクパワー、仕事を手掛かりにして、最大努力で実施する片脚踏切のリバウンドジャンプ (Single-leg Rebound Jump: SRJ) と両脚踏切のリバウンドジャンプ (Double-leg Rebound Jump: DRJ) による相違について検討することを目的とした。陸上競技を専門とする男性14名を対象にSRJとDRJを行なわせ、それぞれの3次元的なキネマティクスおよびキネティクスの変量を算出した。主な結果は、以下の通りである。

- 1) SRJはDRJと比較して、股関節における屈曲伸展軸まわりの関節仕事に加え、内外転軸および内外旋軸まわりの関節仕事が大き

く、このことには股関節外転および内旋トルクの大きさがそれぞれ影響していることが示唆された。

- 2) SRJはDRJと比較して、股関節外転トルクおよび内旋トルクが大きいことには、SRJを成立させる際に発生する解剖学および力学的な諸条件の相違が影響していることが示唆された。
- 3) SRJにおいてのみ、股関節外転トルク発揮は跳躍高の増大に影響しており、このことが、SRJにおいてDRJよりも片脚あたりにより高く跳ぶことのできる要因の1つであることが示唆された。
- 4) SRJでは、体幹において側屈トルクが発揮されることで側屈運動が生じており、これにより骨盤の拳上動作による身体重心の左右変位を抑制し、SRJを成立させることに影響していることが示唆された。

本研究の結果から、SRJは股関節伸筋群に加え、内旋筋群、特に外転筋群のパワー発揮を優先する技術や力発揮能力の改善に対して有効なトレーニング手段となることが示唆された。さらに、SRJにおいて股関節外転トルクは、姿勢制御という役割とともに、跳躍高の増大という役割も有する可能性のあることも示唆された。これらの知見は、下肢のバイオメトリックスを実施する際の留意点や効果的な利用法について考える場合の判断材料になると考えられる。

文 献

阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. *J. J. Sports Sci.*, 15: 155-162.

有賀誠司 (2007) パワー獲得トレーニング. 新星出版社: 東京, pp. 50.

Baechle, T.R., and Earle, W.R. (2008) *Essential of strength training and conditioning* (3rd edition). Human Kinetics: Champaign, IL, pp. 413-456.

Bobbert, M.F. (1990) Drop jumping as a training method for jumping ability. *Sports Med.*, 9: 7-22.

Bobbert, M.F., Huijing, P.A., and Van Ingen Schnau, G.J. (1987a) Drop jumping. I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Med.*

Sci. Sports Exerc., 19: 332-338.

Bobbert, M.F., Huijing, P.A., and Van Ingen Schnau, G.J. (1987b) Drop jumping. II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19: 339-346.

Chu, D.A. (1998) *Jumping into plyometrics* (2nd edition). Human Kinetics: Champaign, IL, pp. 28.

遠藤俊典・田内健二・木越清信・尾懸 貢 (2007) リバウンドジャンプと垂直跳の遂行能力の発達に関する横断的研究. *体育学研究*, 52: 149-159.

Kariyama, Y., Mori, K., and Ogata, M. (2011) The differences between double and single leg takeoff on joint kinetics during rebound-type jump. *Proceedings of the XXIX-th Congress of the International Society of Biomechanics in Sports, Porto, Portugal*, 279-282.

菊山 靖・遠藤俊典・藤井宏明・森 健一・尾懸 貢・函子浩二 (2012) 片脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプの動作および力発揮特性: 両脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプと比較して. *体育学研究*, 57: 143-158.

勝平純司・山本澄子・江原義弘・櫻井愛子・関川伸哉 (2011) 介助にいかすバイオメカニクス. 医学書院: 東京, pp. 32.

小池関也・森 洋人・阿江通良 (2006) 多体系の運動方程式に基づく跳躍動作の動力学的分析: 身体重心鉛直速度に対する下肢関節トルクの貢献度. *ジョイント・シンポジウム講演論文集*, 17-22.

倉林 準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. *バイオメカニクス学会誌*, 27: 29-36.

Markovic, G. (2007) Does plyometric training improve vertical jump height? A meta-analytical review. *Br. J. Sports Med.*, 41: 349-355.

Markovic, G., and Mikulic, P. (2010) Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. *Sports Med.*, 40: 859-895.

McNeely, E., and Sandler, D. (2009) *Power plyometrics: The complete program* (2nd edition). Meyer & Meyer sport (UK) Ltd.: Maidenhead, pp. 44.

中村隆一・齋藤 宏・長崎 浩 (2007) *基礎運動学* (第6版). 医歯薬出版: 東京, pp. 245.

Villarreal, E.S., Kellis, E., Kraemer, W.J., and Izquierdo, M. (2009) Determining variables of plyometric training for improving vertical jump height performance: A meta-analysis. *J. Strength Cond. Res.*, 23: 495-506.

- Villarreal, E.S., Requena, B., and Newton, R.U. (2010) Does plyometric training improve strength performance? A meta-analysis. *J. Sci. Med. Sport.*, 13: 513-522.
- 渡邊將司・河合郁儀・北川 亘・加藤 満 (2009) 片脚で行うボックスドロップジャンプトレーニングの有効性. *陸上競技研究*, 76: 45-51.
- Wells, R.P., and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: *Human locomotion 1 (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian society of biomechanics)*. pp. 92-93.
- 関子浩二・高松 薫 (1995) リバウンドドロップジャンプにおける踏切時間を短縮する要因: 下肢の各関節の仕事と着地に対する予測に着目して. *体育学研究*, 40: 29-39.
- 関子浩二・高松 薫 (1996) リバウンドドロップジャンプにおける着地動作の違いが踏切中のパワーに及ぼす影響—膝関節角度に着目して—. *体力科学*, 45: 209-218.
- 関子浩二・高松 薫・古藤高良 (1993) 各種スポーツ競技者における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. *体育学研究*, 38: 265-278.
- (平成24年5月9日受付)
(平成24年12月4日受理)
- Advance Publication by J-STAGE
Published online 2013/1/18